中国大田作物智慧种植目标、关键技术与区域模式

李　莉[1]，李民赞[2*]，刘　刚[1]，张　漫[2]，汪懋华[1,2]

（1. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室，北京 100083；2. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室，北京 100083）

摘　要：大田作物智慧种植业是智慧农业的重要内容。本文通过分析智慧农业发展历程，明确了大田作物智慧种植业发展战略总体目标和重点任务，凝练出关键技术，有针对性地提出适宜中国区域特征的发展模式。大田作物智慧种植的关键技术面临的主要挑战有：缺乏原位精准测量技术与农业专用传感器，作物模拟模型与实际生产有较大差别，信息传输技术的实时性、可靠性、通用性和稳定性有待改进，智能农业装备还需要进一步解决好农机/农艺相结合问题。在以上分析基础上，提出了大田作物智慧种植关键技术的5个一级技术以及相应的18个二级技术。5个一级技术包括环境与生物信息感知技术、信息移动互联与农业物联网技术、云计算与云服务技术、大数据分析与决策技术、智能农机装备与农业机器人技术。根据中国种植业区域特色提出了相应的6种智慧农业发展区，即东北与内蒙古规模化智慧生产发展区，京津冀鲁智慧都市农业与节水农业发展区，西北旱区棉花规模化智慧种植和旱作智慧农业绿色发展综合试验区，东南沿海循环型水稻智慧种植业综合发展试验区，长江中下游平原智慧粮油优化发展区，以及西南山区智慧特色农业发展区。最后从基础设施建设、技术、人才和政策角度给出了发展建议。

关键词：智慧种植；感知技术；物联网；智能农机装备；无人农场；大数据；移动互联；智慧农业

中图分类号：S-1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202207003

引用格式：李莉, 李民赞, 刘刚, 张漫, 汪懋华. 中国大田作物智慧种植目标、关键技术与区域模式[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(4): 26-34.

LI Li, LI Minzan, LIU Gang, ZHANG Man, WANG Maohua. Goals, key technologies, and regional models of smart farming for field crops in China[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 26-34. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

大田种植业是中国农业生产的主要组成部分。由于人口多、耕地面积相对较少，从保证粮食安全角度出发，中国政府一直把粮食生产放在农业主要地位。2021年全国粮食总产量约为68,285万吨，比2020年增加1336万吨，增长了2.0%。其中谷物产量63,276万吨，比2020年增加1602万吨，增长了2.6%[1]。

智慧农业是在新一代信息技术飞速发展背景下提出的引领农业可持续发展的新理念[2,3]。20世纪90年代初中期，发达国家提出了精细农业（Precision Agriculture）概念，基于信息技术推进农业生产经营信息化与可持续发展[4]。在精细农业发展基础上的智慧农业是现代信息技术与农业的深度融合，不仅需要有更快捷、准确度更高、成本更低廉和多元化信息共享服务机制的支持，还要综合不同地区农业与生物资源、环境、生态和社会经济条件进行分析，同时善于用生产管理

收稿日期：2022-07-07

基金项目：中国工程院重大咨询研究项目（2019-ZD-5）；中国农业大学中央高校基本科研业务费（2022TC053）

作者简介：李　莉（1978—），女，博士，副教授，研究方向为智慧农业信息获取与系统集成。E-mail：lily@cau.edu.cn

*通信作者：李民赞（1963—），男，博士，教授，研究方向为智慧农业系统集成。E-mail：limz@cau.edu.cn

者的智慧来充分利用客观的数据信息，做出科学、节本、增效的管理决策。2013年，联合国粮食及农业组织发表了*CSA-Climate-Smart Agriculture*专著[5]，详尽论述了气候变化条件下的智慧农业发展途径。之后，智慧农业，特别是面向大田粮食作物的新的农业理念在世界范围内迅速传播、发展。

近年来，党和国家高度重视智慧农业的发展。2021年中央一号文件《中共中央、国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》提出了要发展智慧农业，建立农业农村大数据体系，推动新一代信息技术与农业生产经营深度融合。农业农村部同年发布《关于落实好党中央、国务院2021年农业农村重点工作部署的实施意见》，提出要加强高标准农田建设、打好种业翻身仗、大力推进农业机械化、强化农业科技支撑服务、加快发展智慧农业。2022年中央一号文件《中共中央、国务院关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见》继续聚焦乡村振兴，提出要推进智慧农业发展，促进信息技术与农机农艺融合应用。

社会、经济的发展和国内外形势的变化对中国大田作物生产提出了更高的要求，除了要保持高产、稳产，还必须重视食品品质、营养、安全、环保等特殊要求。智慧农业技术体系的发展，为新时期健康发展大田作物生产，满足粮食安全和国民经济发展需求提供了技术支撑，此外，非农业领域的跨界技术应用也为智慧农业关键核心技术创新带来新的契机[6]，因此研究大田作物智慧种植发展战略非常必要。

智慧种植业就是针对农作物生产，集成应用现代计算机技术和信息通信技术（Information and Communications Technology，ICT）等，通过生物技术、工程技术和管理技术的深度融合，实现农作物生产过程的精准感知、定量决策、智能作业与智慧服务，大幅提高土地产出率、资源利用率和劳动生产率，全面提升农产品质量效益和促进种植业可持续发展。

2 大田作物智慧种植发展战略总体思路

2.1 总体目标

随着中国城镇化和劳动力老龄化的加剧，劳动力成本越来越高，农业面临着“谁来种地，怎样种好地”的重大问题，以及大田作物质量效益不高、国际竞争力不强等多重挑战。现代信息技术能够为大田种植提供前所未有的新动能，将现代信息技术与大田作物智慧生产深度融合，大力发展智慧种植业已成为重要国家战略之一。实现农业现代化是“两个一百年”奋斗目标的主要组成部分，大田作物智慧种植业是现代农业的主要发展方向之一。大田作物智慧种植业总体发展目标为：实现大田作物智慧生产过程“天空地”一体化多源精准感知、智能装备精细作业、智慧生产知识体系深度融合和技术装备高效联通，建设完善的云服务体系，使大田种植产业智慧化程度进入国际产业技术先进行列。构筑以无人农场为基础的大田智慧种植业技术体系，形成具有高度智能化水平的大田种植生产决策管理与服务体系。

2.2 重点任务

2025年是第十四个五年计划收官之年，也将是“二十大”后初见成效之年，结合“两个一百年”奋斗目标，2035年是从“十四五”初期距2049年新中国成立一百年的中点，到2049年时，要基本实现现代化，建成富强民主文明的社会主义国家的伟大目标。因此本文按上述时间节点，瞄准农业农村现代化与乡村振兴战略的重大需求，围绕大田种植业的总体发展目标，研究各阶段的重点任务。

（1）至2025年重点任务。围绕实现大田作物生产自动化、信息化、智能化（机器人代替人力）的目标，重点开展大田生产提质增效关键技术创新与发展研究。加快推进农业专用传感技术在大田种植领域的应用，重点突破不同应用场景

下的传感稳定性问题，形成稳定可靠的感知设备，打造具有农业特色的先进传感器品牌，建设农业专用传感器标准体系，促使农田信息感知技术发生重大变革，乡村振兴取得重要进展。

（2）至2035年重点任务。围绕实现大田种植产业智慧管理、智能生产、智慧服务（机器代替人脑）的目标，重点开展大田智慧种植关键技术创新与示范。加快推进智慧农业技术和智能控制装备在大田种植领域的应用，重点突破全领域、全过程农田和作物信息的互联共享与安全问题，形成稳定可靠的全国大田耕地与种植作物产业图谱，打造具有中国特色的大田全产业链云服务平台，建设大田农业专属智慧服务体系，促使国家粮食安全保障体系重大变革。基本完成无人农场技术体系的构建，在智能农机装备和农业机器人的支撑下，实现农业生产工厂化。

（3）至2050年重点任务。确立大田种植产业智慧/智能生产体系的目标，大田作物种植业全面、全程实现智慧/智能化，生产过程、农产品品质可调可控，依靠智慧农业生产体系和技术，彻底解决粮食安全和食品安全问题。

3 大田作物智慧种植关键技术

智慧种植业是信息经济时代基于新一代ICT与农业现代化深度融合发展的集成体系，其技术核心可以概括为“感、移、云、大、智”五个主要环节。“感”是指高效感知技术，包括农业信息先进感知技术和农业传感器。“移”是指移动通信和移动互联技术，实现农业信息的实时传递和农业生产的实时调控。“云”是指云计算和云服务，支撑农业生产数字化和信息化。“大”是指大数据技术，农业数据是大田智慧种植业的基础，农业大数据技术是智慧农业时代数据挖掘和大数据应用的工具。“智”包括智慧和智能，例如大田种植智慧管理决策、大田种植智能装备等等，是智慧农业的核心。随着现代农业的发展，“感移云大智”技术在智慧农业领域发挥着核心作用。

3.1 存在的挑战

从发展大田作物智慧种植业的产业转型升级和高质量发展的需求出发，“感移云大智”还存在如下问题与挑战。

（1）在信息获取技术方面，缺乏原位精准测量技术与农业专用传感器。大田种植业由于其作业环境受到气象环境和地域差异性影响非常大，而且作业具有农时限制较大等因素，对原位精准测量技术有迫切需求。然而，大多科研成果仅适用于某些作物或者某些区域，缺乏普适性，导致智慧农业发展所依赖的获取信息源头出现偏差，影响到后期数据的分析和控制决策。

（2）在信息传输技术方面，实时性、可靠性、通用性和稳定性还有待改进。农业生产环境的特点和低功耗传感器的技术需求对农业物联网的数据传输提出了实时性、可靠性、通用性和稳定性等更高的要求[7]。由于缺乏标准和规范，物联网在该领域的标准化应用受到限制[8]。

（3）在信息处理与决策方面，模拟模型与实际生产差别较大。目前，在大田智慧种植中，农业知识模型、农业模式识别、农业知识表示、农业病虫害诊断机器学习等方面都取得了显著进展[9,10]。但部分模型、算法还不足以全面反映客观现实，指导农业精细生产时还有局限[11-13]。农业大数据技术目前面临的挑战是如何使大数据转化为便于农民接受和使用的智能数据，为精细农业和智慧农业的研究与实践提供知识支撑。

（4）在智能农业装备应用方面，还需要进一步解决好农机/农艺相结合问题。农业的作业对象是土壤、动植物等有系统组织结构和生物活性的客体，智能农业装备只有与农业科学和生物与生命科学技术相互交叉、渗透、融合，才能满足现代农业生产工艺技术要求，农机与农艺的契合性仍需进一步挖掘[14]。

3.2 关键技术

“感、移、云、大、智”是大田作物智慧种植业技术体系的关键环节，因此本文重点围绕这

五个环节开展了智慧种植业关键技术的分析、遴选，最终确定了5个一级技术以及相应的18个二级技术。5个一级技术是环境与生物信息感知技术、信息移动互联与农业物联网技术、云计算与云服务技术、大数据分析与决策技术，以及智能农机装备与农业机器人技术。大田作物智慧种植关键技术清单思维导图如图1所示。

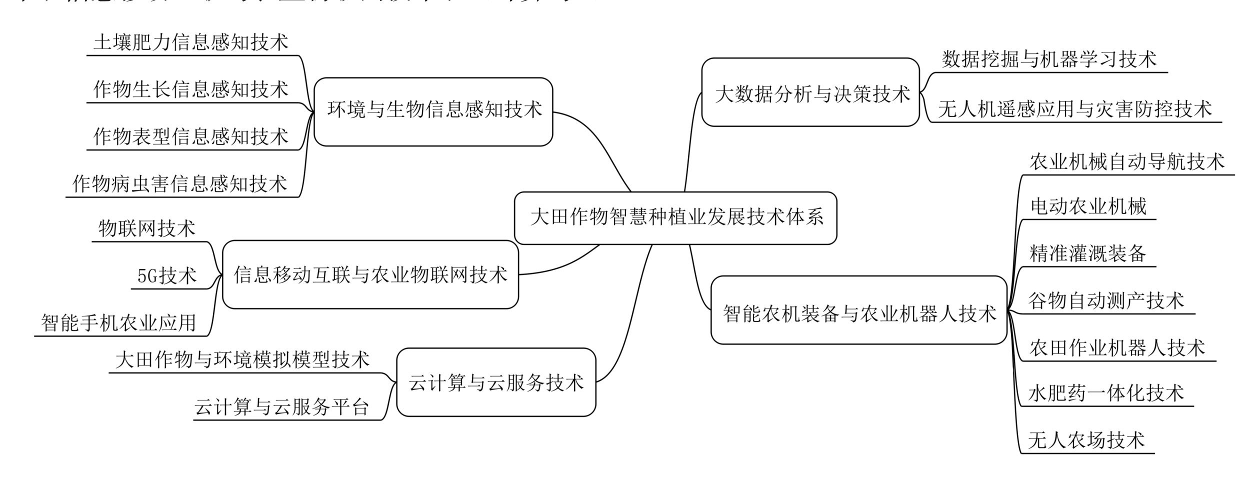


图1　大田作物智慧种植领域关键技术清单思维导图

Fig. 1 Mind map of key technologies list in the smart farming of filed crops

3.2.1　环境与生物信息感知技术

该一级技术包含4项二级技术：土壤肥力信息感知技术、作物生长信息感知技术、作物表型信息感知技术和作物病虫害信息感知技术。

土壤是农业的基础，现有的现场快速检测设备在检测灵敏度、精密度和准确度方面无法满足对土壤多参数原位快速检测的需求[15-18]，而且核心部件主要依赖进口。因此，急需研发和推广具有自主知识产权的土壤多参数快速检测核心硬件和集成技术。

大田作物生长发育实时监测技术可以监测和预测作物各方面的生长状况指标，对于作物的田间智慧管理、产量预测、品质检测和采收等具有切实的指导意义[19, 20]。

作物表型组学的测量目标多为常见的粮食和经济作物，如小麦、玉米、高粱、大麦和豆类等，通过表型测量技术对作物形态学参数和生理学参数的自动化高通量测量，为作物的智慧育种以及智慧管理提供关键信息[21-24]。

作物病虫害是农业生产过程中影响粮食产量和质量的重要生物灾害，对病虫害进行早期预警和防控对减少农业化学药剂的使用量和残留量，促进生态环境和农产品安全，以及对于中国粮食贸易策略制定和社会经济发展均具有重要战略意义[25-27]。

3.2.2　信息移动互联与农业物联网技术

该一级技术包含3项二级技术：物联网技术、5G技术和智能手机农业应用。

目前中国已经发展了多项大田种植类农业物联网应用模式[28]，包括水稻、小麦、玉米、棉花、果树和菌类等作物种类，形成的应用模式包括智能灌溉、土壤墒情监测和病虫害防控等单领域物联网系统，也包括涵盖育苗、种植、采收、仓储等全过程的复合物联网系统。

基于5G的新一代移动互联技术在大田种植中发挥着重要作用[29-31]，利用5G大带宽、低时延特性，可实现农机的无人化作业，包括无人拖拉机、无人插秧机和无人收割机等。

智能手机正在逐渐成为重要的现代农业装备，通过APP完成农田信息获取、农业机械操控以及农产品电子商务等智慧农业生产相关的功能。

3.2.3　云计算与云服务技术

该一级技术包含2项二级技术：大田作物与环境模拟模型技术和云计算与云服务平台技术。

作物生长模型是根据作物品种特性、气象条件、土壤条件以及作物管理措施，采用数学模型方法描述作物光合作用、呼吸作用、蒸腾作用，以及营养等机理过程，可以准确模拟作物在单点尺度上生长发育的时间演进以及产量的形成动态过程[32]。

作物和环境模拟模型技术为大田作物智慧种植云计算与云服务平台提供了有力工具。以作物识别为例，把作物生长模型及各项参数输入到云服务器，通过云平台强大的分析运算功能可以识别区分不同作物或者作物的不同生长阶段，区分杂草和作物以优化除草剂实施方案等[33]。

3.2.4 大数据分析与决策技术

该一级技术包括2项二级技术：数据挖掘与机器学习技术，无人机遥感应用与灾害防控技术。

农业大数据技术包括清洗、集成、融合和挖掘等，以发现隐藏其间的数据价值，为发展智慧农业提供指导和服务。机器学习是人工智能的核心研究领域之一，利用机器学习提供的技术进行数据挖掘来分析农业大数据，二者协同互补促进大田种植大数据分析与决策技术的发展[34, 35]。

在农作物种植前采用无人机对土壤进行监测分析，对农业种植的前期规划具有至关重要的作用。生长期的作物生长无人机检测可为农田的智慧管理提供可靠的基础数据。中国的无人机植保已成为发展最快的新兴领域，也是未来农业发展的主要方向之一[36-38]。

3.2.5 智能农机装备与农业机器人技术

该一级技术包括7项二级技术：农业机械自动导航技术、电动农业机械、精准灌溉装备、谷物自动测产技术、农田作业机器人技术、水肥药一体化技术，以及无人农场技术。

北斗系统的建成与应用保证了中国农业机械的自动导航技术的可靠性和健康发展。农机自动导航驾驶系统主要应用于播种、开沟、起垄、中耕、打药等对直线度及结合线精度要求较高的作业。

电机和电池技术的发展尤其是低速大扭矩电机技术的成熟，为电动农业装备的发展提供了基础条件。

灌溉、收获、水肥药一体化等精细作业技术和农业机器人是现代信息技术与现代农业深度融合的典范，推动农业生产向优质、高产、低污染、节水、节能、智能和现代化方向发展。

无人农场是在人不进入农场的情况下，综合采用物联网、大数据、人工智能、5G、智能农机装备和农业机器人等上述的所有关键技术，完成所有农场生产、管理任务的一种全天候、全过程、全空间的无人化生产作业模式。无人农场代表着最先进的农业生产力，将引领大田作物智慧种植业的发展[39]。

4 大田作物智慧种植区域发展模式

中国地域辽阔，不仅区域自然条件差别较大，同一区域内部也存在较大差异，作物种类和特色也不尽相同，因此从战略角度全局考虑，本文结合中国不同区域特征提出了6种大田作物智慧种植业发展模式。

4.1 东北与内蒙古——规模化智慧农业生产发展区

东北三省是中国粮食“压舱石”，东北三江平原是国家重要商品粮基地，人均粮食产量是全国平均的四倍。近年，三江平原智慧农业发展一直是中国的领头羊之一，智慧农场示范、“企业+现代农业”模式的无人农场探索，为中国农业先进地区发展智慧农业探索出了可行的模式。松嫩平原和辽河平原一带以玉米和大豆为主，这里土地肥沃，分布有世界三大黑土带的东北黑土，是中国重要的粮食主产区。根据东北三省区域的地域特点，在规模化农户种植和家庭农场的基础上，适宜发展规模化农户种植模式，继续为保证中国的粮食安全发挥重要作用。

内蒙古自治区也是中国粮食生产的重要基地和重要的牧区之一。内蒙古地区发展牧草生产具有天然的优势，牧草生产作为产业适于规模化经营，因此内蒙古宜采用规模化模式发展智慧牧草生产。

4.2 京津冀鲁——智慧都市农业与节水农业发展区

京津冀鲁地处华北平原（或称黄淮海平原），京津作为2个直辖市，将主要以发展智慧都市农业为主，而冀鲁两省自然条件相似，又都处于黄淮海平原，缺水一直是该地区农作生产面临的最大难题，发展智慧型节水农业是冀鲁两省农业可持续发展的必由之路。冀鲁农业宜采用农业合作社、家庭农场以及规模化农业模式，以节水高效农业为抓手，以智慧农业关键技术为支撑，推广墒情物联网检测、作物生长检测、滴灌等现代农业技术，保证冀鲁地区农业的可持续发展。

4.3 西北旱区——棉花规模化智慧种植和旱作智慧农业绿色发展综合试验区

西北旱区（非行政区划）包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和山西等省区，这一区域除了陕西关中平原风调雨顺、土地肥沃、农业发达外，其他地区都面临恶劣的气候条件，特别是水资源短缺，属于旱作农业区。棉花是新疆（含新疆生产建设兵团）的主要作物，在国家、自治区、生产建设兵团的支持、补贴和引导下，新疆棉花生产的机械化、数字化、精细化和智慧化迅速发展。在新的国内外形势下，新疆棉区对发展智慧种植业的要求会更迫切，采用“企业+现代农业”模式发展智慧农业将是必然的选择。

除了陕西关中平原和新疆棉区之外，西北旱区其他农业区自然条件相近，地形地貌复杂，呈现灌溉农业区、旱作农业区、草原牧区和沙漠戈壁区等交错分布的空间格局。且西北旱区旱作农业发展成效显著，地膜覆盖、膜下滴灌、保护性耕作等现代农业技术发挥了重要作用。因此以发展节水高效农业为核心，采用“农户+合作社”、家庭农场或规模化农户种植模式发展智慧农业是这一地区发展现代农业的方向。

4.4 东南沿海——循环型水稻智慧种植业综合发展试验区

东南沿海包括浙江、福建、广东、海南和广西的东部地区，这里纬度低，自然条件优越，光热充足，降水丰沛，为该地区发展特色农业、区域农业、循环型农业创造了有利条件。发展智慧农业是建立循环农业体系的技术支撑，广东开展的水稻栽培无人农场实验，大大提高了劳动生产率，提高了资源利用效率。基于无人机智能植保作业，使得农药使用精准可控，为发展循环农业创造了条件。发展东南沿海地区以循环型农业为特色的智慧农业体系，采用“农户+合作社”或者家庭农场的方式是较优选择。

4.5 长江中下游平原——智慧粮油优化发展区

长江中下游平原地区包括上海、江苏、安徽、湖南、湖北和江西等地区农业发达，土地垦殖指数高，是中国重要的粮、油、棉生产基地。推动长江中下游地区农业绿色发展，对于实现长江经济带、长江流域乃至全国整体绿色发展具有重要意义。为实现该区域农业绿色发展这一目标，必须发展精细农业，提高水肥效率。长江中下游地区需要充分利用当前现代农业“数字化”转型发展的历史机遇，大力发展精细农业和智慧农业等现代农业模式，构建长江中下游平原特色的粮油作物智慧化生产体系，提高水、肥等各种资源利用效率，加快区域农业绿色发展步伐。

4.6 西南山区——智慧特色农业发展区

西南山区包括四川、重庆、云南、贵州和西藏自治区。西南山区山地和丘陵地形较多，耕地面积较小且分布较为零散，坡地耕种面积的比例超过了所有耕种面积的七成。中国西南山区的土地较为贫瘠、土壤侵蚀较为严重，这些客观的自然原因造成西南山区的农业作物的产量一直较低，发展现代农业宜采用农户或“农户+合作社”方式，促进智慧特色农业发展。积极开展优质粮油、特色水果、特色食用菌和高原蔬菜品种选育，为特色产业发展提供品种支撑。

5 总结与建议

发展大田作物智慧种植业应该作为乡村振兴和农业现代化的重要内容，纳入有关发展战略和

总体规划。立足目前中国大田种植业发展现状，深刻理解制约产业发展的桎梏，规划智慧大田产业集群，从顶层设计完善的产业链，制定路线图和时间表。

从基础设施建设角度，发展大田作物智慧种植业需要加强大田作物智慧生产基础设施建设。将大田种植智慧生产专用传感器、高速稳定的信息传输系统、智能化农业机械装备等纳入国家新基建内容，构建适用的云平台提供高效的智慧化服务，扶持农业生产用户运用先进技术和物质装备以及手机等，建立智慧大田服务企业与新型经营主体和小农户的共享机制。

从技术角度，重点突破大田作业中信息获取专用传感技术、作物表型信息与生长需求关系模型，提升传感器与智能装备的可靠性，突破卡脖子的共性关键技术，形成一整套共性关键技术的行业标准，提升大田种植产业发展的国际竞争力。

从人才角度，加强高水平创新人才和团队培养力度，加强学科体系建设与宣传，完善农学、农业工程学、信息学等多学科交叉融合，完善人才激励制度，培养复合型人才[40]。

从政策角度，发展大田作物智慧种植业需要充分发挥“产-学-研-用”共建共享共赢共创的合作模式，加强高水平创新人才和团队培养力度，加强国家级创新平台建设。加强国际交流与合作，提升智慧大田种植业国际竞争力。

参考文献:

[1] 新华网 . 2021年全国粮食总产量达13657亿斤同比增长2.0%[EB/OL]. (2021-12-06) [2022-06-22]. http://www.news.cn/politics/2021-12/06/c_1128134859.htm.

[2] 汪懋华院士: 关于智慧农业释义与创新驱动发展的思考[J]. 农业工程技术, 2018, 38(21): 24-28.

[3] 齐美娟 . 精细农业的实践助推智慧农业创新发展——访中国工程院院士、国际欧亚科学院院士汪懋华[J]. 中国国情国力, 2018(7): 6-7, 5.

[4] IDOJE G, DAGIUKLAS T, IQBAL M. Survey for smart farming technologies: Challenges and issues[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 92: ID 107104.

[5] The World Bank Group. Climate-Smart Agriculture [EB/OL]. (2021-04-05) [2022-06-22]. https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture.

[6] 胡瑞法, 刘万嘉文 . 科技革命、颠覆性技术与智慧农业[J/OL]. [2022-07-24]. 智慧农业(中英文).
HU R, LIU W. Technological revolution, disruptive technology and smart agriculture[J/OL]. [2022-07-24]. Smart Agriculture. https://kns. cnki. net/kcms/detail/10.1681.S.20220720.2005.002.html.

[7] 王亚华, 臧良震, 苏毅清 . 2035年中国农业现代化前景展望[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(1): 16-23.
WANG Y, ZANG L, SU Y. Prospects for China's agricultural modernization in 2035 [J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41 (1): 16-23.

[8] 马龙 . 现代农业发展中物联网应用的困境分析[J]. 中国管理信息化, 2021, 24(24): 106-107.

[9] 李道亮, 杨昊 . 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.
LI D, YANG H. State-of-the-art review for Internet of Things in agriculture[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49 (1): 1-20.

[10] 黄魏, 许伟, 汪善勤, 等 . 基于不确定性模型的土壤——环境关系知识获取方法的研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 54-63.
HUANG W, XU W, WANG S, et al. Extraction of knowledge about soil-environment relationship based on an uncertainty model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1):54-63.

[11] 赵福年, 王润元 . 基于模式识别的半干旱区雨养春小麦干旱发生状况判别[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (24): 124-132.
ZHAO F, WANG R. Discrimination of drought occurrence for rainfed spring wheat in semi-arid area based on pattern recognition[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 124-132.

[12] WHITE E L, THOMASSON J A, AUVERMANN B, et al. Report from the conference, 'identifying obstacles to applying big data in agriculture'[J]. Precision Agriculture, 2021, 22: 306-315.

[13] KENDALL H, CLARK B, LI W. et al. Precision agriculture technology adoption: A qualitative study of small-scale commercial "family farms" located in the North China Plain[J]. Precision Agriculture, 2022, 23: 319-351.

[14] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等 . 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 1-16.
CHEN X, WEN H, ZHANG W, et al. Advnces and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2 (4): 1-16.

[15] 吴嘉敏, 贺玉成, 徐征, 等 . 用于土壤水分测量的磁共振射频线圈宽频匹配方法[J]. 波谱学杂志, 2021, 38 (3): 414-423.
WU J, HE Y, XU Z, et al. A wide-band matching method for radio frequency coils used in soil moisture measurement[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2021, 38 (3): 414-423.

[16] 吕中秀 . 土壤环境监测过程中有机质测定方法对比分析[J]. 山东化工, 2021, 50(18): 291-292.
LYU Z. Comparative analysis of organic matter determination methods in the process of soil environment monitoring[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50 (18): 291-292.

[17] 张飞扬, 胡月明, 谢英凯, 等 . 天空地一体耕地质量监

测移动实验室集成设计[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1029-1038.
ZHANG F, HU Y, XIE Y, et al. Design of integrated space-air-ground farmland quality monitoring mobile laboratory[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1029-1038.
[18] 路逍, 潘林沛, 李雁华, 等. 基于ISE的土壤硝态氮原位检测模型比较[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 297-303.
LU X, PAN L, LI Y, et al. Comparison of detection models for soil nitrate concentration based on ISE[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52 (S1): 297-303.
[19] 蒋焕煜, 应义斌, 谢丽娟. 光谱分析技术在作物生长信息检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2008(6): 1300-1304.
JIANG H, YING Y, XIE L. Research progress on application of spectral analysis technology in detection of crop growth information[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008(6): 1300-1304.
[20] 张晓东, 毛罕平, 倪军, 等. 作物生长多传感信息检测系统设计与应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 164-170.
ZHANG X, MAO H, NI J, et al. Intelligent detection system of multi-sensor information for growing crops[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(9): 164-170.
[21] 邓若玲, 潘威杰, 王志琪, 等. 农作物表型技术及其智能装备研究进展与展望[J]. 现代农业装备, 2021, 42 (1): 2-9.
DENG R, PAN W, WANG Z, et al. Research progress and prospect of crop phenotyping technology and its intelligent equipment[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(1): 2-9.
[22] 程曼, 袁洪波, 蔡振江, 等. 田间作物高通量表型信息获取与分析技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 314-324.
CHENG M, YUAN H, CAI Z, et al. Research progress on high-throughput phenotypic information acquisition and analysis technology of field crops[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S1): 314-324.
[23] 卢少志, 杨蒙, 杨万能,等. 田间作物表型检测平台设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 209-218.
LU S, YANG M, YANG W, et al. Design and experiment of a platform for detecting phenotype of field crop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (4): 209-218.
[24] 朱荣胜, 李帅, 孙永哲,等. 作物三维重构技术研究现状及前景展望[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 94-115.
ZHU R, LI S, SUN Y, et al. Research advances and prospects of crop 3D reconstruction technology[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 94-115.
[25] 王翔宇, 温皓杰, 李鑫星, 等. 农业主要病害检测与预警技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 266-277.
WANG X, WEN H, LI X, et al. Research progress analysis of mainly agricultural diseases detection and early warning technologies[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(9): 266-277.
[26] 杨国峰, 何勇, 冯旭萍, 等. 无人机遥感监测作物病虫害胁迫方法与最新研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(1): 1-16.
YANG G, HE Y, FENG X, et al. Methods and new research progress of remote sensing monitoring crop diseases and pests stress using unmanned aerial vehicle[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(1): 1-16.
[27] 邓巍, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 无人机精准施药关键技术综述[J]. 农业工程, 2020, 10(4): 1-10.
DENG W, CHEN L, ZHANG R, et al. Review on key technologies for UAV precision agro-chemical application[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10 (4): 1-10.
[28] 邬贺铨: 移动互联网已进入"大智移云"时代[EB/OL]. (2015-01-23) [2022-06-22]. https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/1/312128.shtm.
[29] SOLDANI D, MANZALINI A. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(1): 32-42.
[30] 黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述[J]. 通信学报, 2014, 35(8): 184-197.
HUANG T, LIU J, HUO R, et al. Survey of research on future network architectures[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8): 184-197.
[31] 杨普, 赵远洋, 李一鸣, 等. 基于多源信息融合的农业空地一体化研究综述[J]. 农业机械学报, 2021, 52 (S1): 185-196.
YANG P, ZHAO Y, LI Y, et al. Review of research on integration of agricultural air-ground integration based on multi-source information fusion[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(S1): 185-196.
[32] 陈天恩, 刘军萍, 王登位,等. 农业云服务可适性技术研究进展[J]. 中国农业信息, 2018, 30(1): 67-78.
CHEN T, LIU J, WANG D, et al. Advances in adaptable technologies of agricultural cloud services[J]. China Agricultural Information, 2018, 30(1): 67-78.
[33] 郑勇, 王光华, 杜鹏飞. 智慧农业云平台建设探索与实践[J]. 农业工程技术, 2018, 38(21): 31-35.
[34] 许世卫. 农业高质量发展与农业大数据建设探讨[J]. 农学学报, 2019, 9(4): 13-17.
XU S. Discussion on agricultural high-quality development and agricultural big data construction [J]. Journal of Agriculture, 2019, 9 (4): 13-17.
[35] 姜侯, 杨雅萍, 孙九林. 农业大数据研究与应用[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(1): 5-15.
JIANG H, YANG Y, SUN J. Research and application of big data in agriculture[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(1): 5-15.
[36] 张立辉. 农业大数据的应用及发展建议[J]. 南方农机, 2020, 51(14): 47-48.
ZHANG L. Application and development suggestions of big data in agriculture[J]. Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(14): 47-48.
[37] 宋长青, 温孚江, 李俊清, 等. 农业大数据研究应用进展与展望[J]. 农业与技术, 2018, 38(22): 153-156.
[38] YOU Y. Data mining of regional economic analysis based on mobile sensor network technology[J]. Journal of Sensors, 2022, 2022: 1-13.
[39] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人

农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8-17.
LUO X, LIAO J, HU L, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17.
[40] 杨印生, 薛春序, 许莹, 等. 智慧农业的社会经济特征、发展逻辑与系统阐释[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(2): 146-152.
YANG Y, XUE C, XU Y, et al. Social and economic characteristics,development logic and systematic interpretation of smart agriculture[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(2): 146-152.

Goals, Key Technologies, and Regional Models of Smart Farming for Field Crops in China

LI Li[1], LI Minzan[2*], LIU Gang[1], ZHANG Man[2], WANG Maohua[1,2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Smart farming for field crops is a significant part of the smart agriculture. It aims at crop production, integrating modern sensing technology, new generation mobile communication technology, computer and network technology, Internet of Things(IoT), big data, cloud computing, blockchain and expert wisdom and knowledge. Deeply integrated application of biotechnology, engineering technology, information technology and management technology, it realizes accurate perception, quantitative decision-making, intelligent operation and intelligent service in the process of crop production, to significantly improve land output, resource utilization and labor productivity, comprehensively improves the quality, and promotes efficiency of agricultural products. In order to promote the sustainable development of the smart farming, through the analysis of the development process of smart agriculture, the overall objectives and key tasks of the development strategy were clarified, the key technologies in smart farming were condensed. Analysis and breakthrough of smart farming key technologies were crucial to the industrial development strategy. The main problems of the smart farming for field crops include: the lack of in-situ accurate measurement technology and special agricultural sensors, the large difference between crop model and actual production, the instantaneity, reliability, universality, and stability of the information transmission technologies, and the combination of intelligent agricultural equipment with agronomy. Based on the above analysis, five primary technologies and eighteen corresponding secondary technologies of smart farming for field crops were proposed, including: sensing technologies of environmental and biological information in field, agricultural IoT technologies and mobile internet, cloud computing and cloud service technologies in agriculture, big data analysis and decision-making technology in agriculture, and intelligent agricultural machinery and agricultural robots in fireld production. According to the characteristics of China's cropping region, the corresponding smart farming development strategies were proposed: large-scale smart production development zone in the Northeast region and Inner Mongolia region, smart urban agriculture and water-saving agriculture development zone in the region of Beijing, Tianjin, Hebei and Shandong, large-scale smart farming of cotton and smart dry farming green development comprehensive test zone in the Northwest arid region, smart farming of rice comprehensive development test zone in the Southeast coast region, and characteristic smart farming development zone in the Southwest mountain region. Finally, the suggestions were given from the perspective of infrastructure, key technology, talent and policy.

Key words: smart farming; sensing technologies; Internet of Things; intelligent agricultural machinery; unmanned farm; big data; mobile internet; smart agriculture